

研究活動 IX . 物性実験グループ IX - 2 . 半導体物性グループ

雑誌名	年次研究報告
巻	2013
ページ	184-193
発行年	2014-10
URL	http://hdl.handle.net/2241/00124610

IX - 2. 半導体物性グループ

名誉教授 舩本 泰章

准教授 野村 晋太郎、池沢 道男

助 教 富本 慎一

大学院生 12名

【1】量子ドットの分光研究（池沢道男、舩本泰章）

（1）CdS 量子ドットの電荷移動とスピンドィフェージング（舩本泰章、海野晃）

量子ドットから透明導電体への高速電子移動は、高効率量子ドット太陽電池においては極めて重要な要素である。異なるg因子を持つ電子、正孔や励起子を分離して極めて感度よくスピン歳差運動とそのディフェージングを測定できる時間分解ファラディ回転（TRFR）により、量子ドット中に光生成された電子・正孔対が分離して、導電体に移動する過程を可視化する事をめざした。

実験は化学合成されたCdS量子ドットを対象に、フェムト秒Ti:Sapphireレーザー再生増幅器（250kHz）システムからの二倍波を用いて $I_{Se}-I_{Sh}$ 遷移を励起して、電磁石による横磁場下でTRFRによって室温においてスピン歳差運動を測定した。図1は、上から順にトルエン中に入れたCdS量子ドット（平均直径=2.8nm）、TiO₂ナノ粒子にリンクしたCdS量子ドット、N,N'-Bis(3-methylphenyl)-N,N'-bis(phenyl)benzidine（TPD）とCdS量子ドット、CdS/ZnSeコアシェル量子ドットについてのTRFR信号を示す。図1中の上部の3つのトレースは、0.53T下のTRFR、下部のトレースは、1T下のTRFR信号である。LUMO（伝導帯）、HOMO（価電子帯）のエネルギーの上下関係から、CdS量子ドットからTiO₂には電子が移動し、正孔輸送材料TPDへは正孔が移動し、タイプII型CdS/ZnSeコアシェル量子ドットでは電子がCdSコアに残り正孔がZnSeシェルに移ると期待される。図に見られるTRFR信号は、 $g=1.95$ の局在電子の歳差運動がもたらす減衰振動成分と正孔・励起子のg因子の異方性がもたらす非振動成分からなり、室温で $T_2^*=0.35ns$ の量子ドット集団にある局在電子のスピンドィフェージングと正孔輸送ポリマーへの正孔が少しゆっくり移動しているのが観測された。

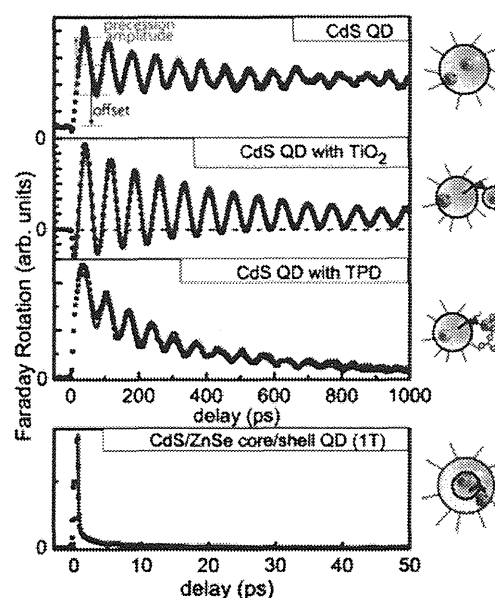


図1：CdS量子ドット（平均直径=2.8nm）、TiO₂ナノ粒子にリンクしたCdS量子ドット、TPDポリマーとCdS量子ドット、CdS/ZnSeコアシェル量子ドットについての時間分解ファラディ回転信号。

(2) CuInS₂ 量子ドットの高速キャリアダイナミクス (Jianhui Sun (孫建輝)^A、Dehua Zhu², Jialong Zhao^{A, B}, 池沢道男, Xiuying Wang^A, 舛本泰章^A Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (中国科学院・長春光学・精密機械・物理研究所)^B College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University (温州大学機械・電気工学部)) [論文4]

毒性の低い量子ドットである CuInS₂ 量子ドットは太陽電池への応用が期待されている。CuInS₂ 量子ドットの光学非線形性発現のメカニズム、および超高速キャリアダイナミクスをフェムト秒過渡吸収分光法を用いて研究した。ブリーチングスペクトルには、サイズに依存した 1S 遷移エネルギーが明瞭に観測され、その粒径依存性は有効質量近似を用いた有限井戸のモデルによる計算と良く一致する。過渡的吸収ブリーチング信号は量子化された電子準位の占有に起因する事が示され、その時間変化から CuInS₂ 量子ドット中の 1S 電子のダイナミクスを議論することが出来る。図 2 に示されるように、CuInS₂ 量子ドットでは、100ps 以下の時間で初期減衰が見られ、初期減衰速度の粒径依存性から、電子は表面の欠陥準位に捕獲され、その捕獲過程は電子のドット表面での確率振幅により支配され、量子ドットの粒径が小さくなるほど促進されると理解できる。一方、CuInS₂/ZnS コアシェル量子ドットでは、表面欠陥準位への捕獲は効果的に抑制され、初期減衰が見られない。このような事実から、CuInS₂ 量子ドットの長寿命発光は、1S 電子と局在正孔間の遷移に関係している事が判明した。この研究により、CuInS₂ 量子ドットの光励起後のキャリアダイナミクスを明らかにすることが出来た。

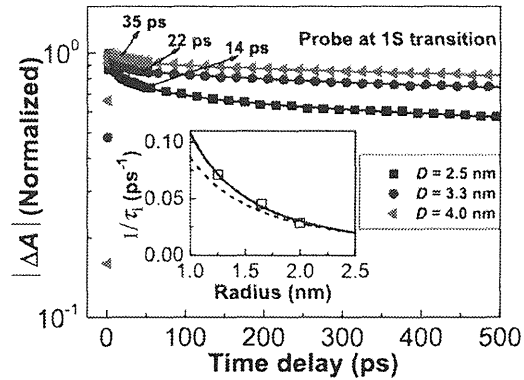


図2:3種類の粒径のCuInS₂量子ドットの過渡吸収時間トレース。挿入図には初期減衰速度をドットの半径に対してプロットを示す。初期減衰速度が表す電子が表面の欠陥準位に捕獲される速度は半径の1.8乗に比例している。破線は捕獲過程が電子のドット表面での確率振幅により支配されるとしたモデル計算結果。

(3) ZnO:Gaのトリオン共鳴カー回転 (舛本泰章, 村上瑛, 海野晃)

核スピンのゼロになる核の自然存在比が大きいため長いスピン緩和時間 $T_2^* = 12\text{ns}$ を持つ ZnO 薄膜中の Ga ドナー (濃度 $6 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$) により与えられた局在電子からトリオンを生成する共鳴励起によるスピン初期化の過程を調べた。

すでにフェムト秒時間分解カー回転測定法では共鳴スピン増幅を用いて長い緩和時間 $T_2^* = 12\text{ns}$ を精度よく求めたが、スペクトル幅が 0.2meV と狭いピコ秒パルス (2ps) を使った時間分解カー回転測定法を用いて、A 励起子の低エネルギー側の裾でレーザーエネルギーを変えてカー回転を調べると、A 励起子と D^0X 共鳴エネルギー近傍で電子のカー回転信号 (磁場 0.5T のとき周期 74ps) が符号を変えながら増強される。特に D^0X 共鳴エネルギー近傍では、 D^0X の発光ピークおよびその 2meV – 4meV ほど低エネルギーでも電子のカー回転信号が増強される。

さらに D^0X 共鳴エネルギー近傍では、120fs の時間分解カー回転測定法で全く見えなかった電子のオ

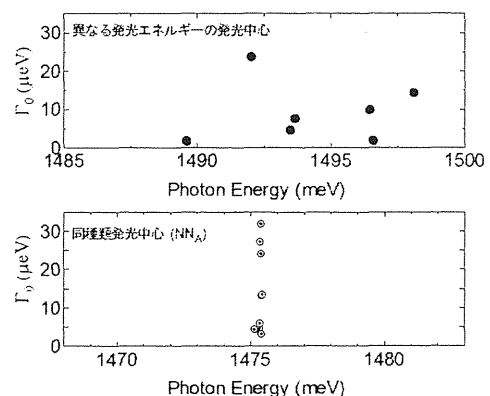


図3: 上は不均一性のある発光中心の均一幅 (位相緩和時間の逆数で決まる) の測定結果。下は、エネルギーが良くそろった NN_A 等電子トラップの均一幅。同一種類の等電子トラップにもかかわらず、上と同じような大きなばらつきが見られる。

差運動以外の微細な振動構造（周期 19ps）がカー回転信号の立ち上がり部分に観測された。

（４）同じ原子配置からなる等電子トラップに束縛された励起子の位相緩和（張遼，池沢道男，佐久間芳樹^A A物質・材料研究機構）

等電子トラップに束縛された励起子の位相緩和機構を解明することは、物理的な興味だけではなく、応用上も光子の干渉性に関わるため重要である。これまでのGaAs中の窒素等電子トラップに関する研究で、エネルギー的には近い発光中心でも位相緩和時間にはばらつきがあることが分かっていた。この原因が、それぞれの発光中心の微細なエネルギー準位の構造に依存するのか、それ以外の効果なのかを切り分けることが必要である。

ある種の等電子トラップは、不純物原子の配置に依存して特定のエネルギーを持ち、同一のエネルギー微細構造を持つので、この問題を議論するために都合が良い。そのような等電子トラップとして、例えばGaP中のNNペアや、GaAs中のNN_A, NN_B, NN_F発光中心などがある。ここでは、GaAs中のNN_A発光中心の位相緩和時間を、発光のフーリエ分光法を用いて測定した。図3上は、不均一性のあるこれまでの試料に関する位相緩和時間の測定結果を示している。横軸に示されているように、10meV程度の発光エネルギーの不均一性があり、対応する均一幅（縦軸）の値もばらついている。図3下に複数のNN_Aについての結果を示す。まず、発光エネルギーは0.1meV程度の不均一性しかなく、極めて良くそろっていることが分かる。しかし、低温での均一幅には3~30μeVもの大きなばらつきが見られる。これは、低温での位相緩和が、主に等電子トラップの周囲の欠陥など、外因性の機構で決まっていることを示している。

（５）単一等電子トラップの共鳴蛍光（池沢道男，張遼，安田直人，佐久間芳樹^A A物質・材料研究機構）

単一の二準位系を狭線幅のレーザーで共鳴励起することによって、二準位系の寿命で決まるフーリエ変換限界の位相緩和時間を超えた、超コヒーレントな単一光子が得られる可能性がある。昨年度までの研究で、GaAs中の窒素等電子トラップについて、試料側面からの共鳴励起光の入射によって散乱光を低減し、単一の等電子トラップから非古典光が発生できる事を確認していた。

これをさらに進めて単一光子としての純度を高めるとともに、発生した非古典光のスペクトルを測定して、自然幅より狭いことを確認することを目指して研究を行った。走査型ファブリーペロー干渉計と、単一光子検出器を組み合わせ、微弱光の高分解能スペクトル測定系を構築した。予備的な実験として、減衰させた励起レーザーのスペクトルを測定する事はできたが、単一の等電子トラップからの共鳴蛍光のスペクトル測定にはまだいくつかの問題があり成功していない。例えば、表面での全反射を利用した現在の手法では、散乱光強度が表面の欠陥に敏感なため、実験の再現性に難がある。さらに、試料内で起こる共鳴励起光の干渉が影響を与えることも分かった。これらは、今後、試料内部に導波路構造を作製することで大幅に改善できるものと期待される。また、共鳴蛍光のスペクトルからは、通常バンド間励起の発光スペクトルでは埋もれていた大きな励起子微細分裂に関する情報が得られることが明らかになり、分光法としても期待される。

（６）GaAs:N中の等電子トラップのパーセル効果（池沢道男，佐久間芳樹^A，迫田和彰^A，杉本喜正^A，張遼^A A物質・材料研究機構）

2次元フォトリソニック結晶を用いた微小共振器を単一の等電子トラップの周りに作製し、パーセル効果を利用した発光寿命の短縮のための研究を開始した。これまでに研究例のある量子ドットと比べて、エネルギーのそろった等電子トラップでは、再現性良く共振器モードと結合させることが期待できる。この手法により発光寿命の大幅な短縮が実現できれば、フーリエ変換限界の単一光子パルスに達する可能性があり、2光子干渉なども期待される。

今年度はGaAs:N中の窒素等電子トラップとのカップリングに最適な2次元フォトリック結晶構造の設計を行い、その試作を行った。高濃度のデルタドーピング層を含む試料についてL3キャビティ（図4上）を作製し、低温で顕微発光スペクトルを測定したところ、キャビティモードに起因すると考えられる鋭いピークが多数観測された。そのエネルギーの設計パラメータ依存性も計算結果とよく一致していた。今後、希薄なデルタドーピング層を持つ試料について同様のフォトリック結晶を作製し、単一の等電子トラップとキャビティモードの結合を実現して、パーセル効果の観測を目指す。

別の方法として、ブラック反射鏡をデルタドーピング層の上下に作りこんだ試料をピラー状にエッチングすることで微小共振器を得る方法も試みている。図4下はGaAsだけの試料についての試作結果で、直径 $2\mu\text{m}$ 程度のピラーが綺麗に形成されているが、ブラック反射鏡のためにはAlGaAsを低屈折率層として用いる必要があり、Alを含む試料についてはエッチング法の改良が必要であることが明らかになった。

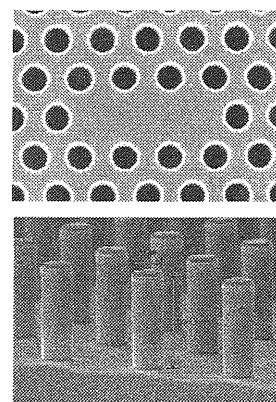


図4：上はL3キャビティの例。下は試作したGaAsのピラー構造。

【2】半導体ナノメートル構造の光物性（野村晋太郎）

(1) 量子ホール系カイラルエッジ状態のスピン分解観測（間明田、柴田、野村）[論文10]
最近、量子ホール効果、量子スピンホール効果、量子異常ホール効果等の端状態に多くの注目が集まっている。これらの端状態では、スピン状態に依存したキャリアの輸送等の興味深い現象が起こるとされている。前年度までに、私達は近接場走査型光学顕微鏡を用いてスピン分裂した量子ホール端状態を実空間で観測することに成功した。本年度は、近接場光プローブにさらに改良を加えた。近接場光プローブと希釈冷凍機内に光を導入するための光ファイバにおいて付加される光の位相を、外部から補正する手法を確立した。以上により、近接場光プローブを用いて希釈冷凍機中の試料に円偏光を照射することに成功した。光学的手法の特徴の一つは照射光の円偏光状態を制御することにより、光生成される電子のスピン状態を制御可能なことであるが、従来は近接場光プローブのわずかな歪みによる複屈折や偏光に依存した散乱により近接場走査型光学顕微鏡を用いた偏光に依存した測定は難しいとされていた。

以上の研究成果を受けて、量子ホール系カイラルエッジ状態のスピン分解観測を行った。希釈冷凍機温度においてGaAs/AlGaAs変調ドーピング単一ヘテロ接合ホールバール構造の光起電圧の空間分布を磁場の符号と入射光の円偏光状態を変えて詳細に調べた。その結果、スピン分裂した量子ホールカイラル端状態のマップ図を得た。さらに、奇数局所電子占有数 ν_L^* に対して大きな円偏光依存

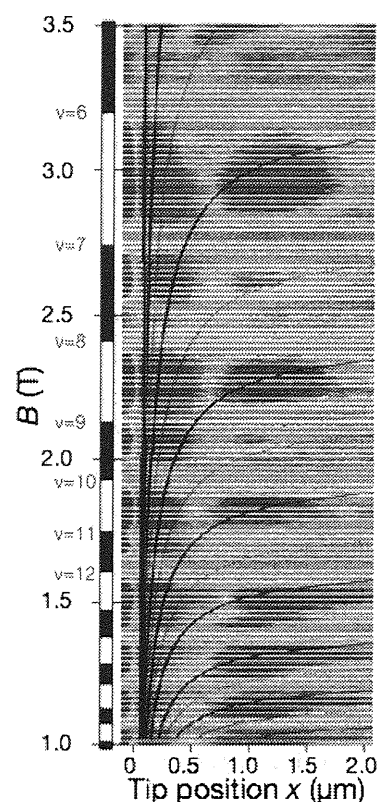


図5：近接場走査型光学顕微鏡を用いて観測した光起電圧の空間微分のマップ図。スピン分裂した量子ホール系カイラルエッジ状態が観測された。励起光エネルギーは1.5194 eV、温度は250 mK。

性を示すマップ図を得た。このマップ図は光生成電子のスピンの向きと整合し、スピン偏極した電子が注入されていることを明確に示した。私達の手法は、例えばスピンの向きに依存した方向にキャリアの流れる量子スピンホール端状態を検証するための新しい手法となると期待される。本研究は低温物性グループの大塚洋一教授、産業技術総合研究所柏谷聡氏、NTT 物性科学基礎研究所山口真澄氏、田村浩之氏との共同研究である。

(2) 半導体二次元電子系の分数量子ホール領域における発光分光 (野村) [論文 7]

分数電荷をもつ準電子、準正孔、スピン反転した準電子等の励起が電子-正孔からなる励起子と束縛した「分数電荷準励起子」の可能性が理論的に示されていたが、その存在を示す実験は報告されていなかった。従来、分数量子ホール効果領域の分光学的研究は10 T以上の強磁場で行われてきたが、私達は、高移動度、極低電子密度の二次元電子系をゲート電圧によって誘起可能な高品質な非ドープ量子井戸試料を用い、6 T以下の比較的低い磁場において円偏光分解して発光スペクトルを調べた。その結果、 $\nu=1/3$ 近傍の σ^- 円偏光発光において4-5本に分裂した微細構造を見いだした。その内の一つは準電子の存在する $\nu \geq 1/3$ においてのみ観測され、 $\nu < 1/3$ には見られなかった。また、この発光ピークは $T \geq 700$ mK の高温で消失した。この結果はスピン自由度を取り入れたHaldane 球上の厳密対角化計算結果との比較により、分数電荷準励起子からの発光であると理解された。

さらに、 $\nu=1/4$ 近傍において三重項準励起子からの発光が $T=25$ mK において消失し、 $T \geq 700$ mK の高温で回復することが見いだされた。Haldane 球上の厳密対角化計算によって、光遷移確率の電子密度依存性が計算され、 $\nu=1/4$ において有限サイズ効果により三重項準励起子状態の全ての角運動量空間での低いエネルギー状態の振動子強度が0になり、光遷移確率が消失することが示された。 $\nu=1/4$ は、4本の磁束量子を付着させた複合フェルミオンのフェルミ液体として理解されるが、有限系での計算では、ウィグナー結晶状態が形成されて低いエネルギー状態からの光遷移確率が消失する可能性が示された。実験で観測された $\nu=1/4$ 近傍における発光の消失は、試料中の不規則性により有限サイズ効果と同等の状態が実現されているためであると考えられる。

本研究はNTT 物性科学基礎研究所山口真澄氏、田村浩之氏、東北大学教授平山祥郎氏、NRC Canada, Pawel Hawrylak 氏のグループとの共同研究である。

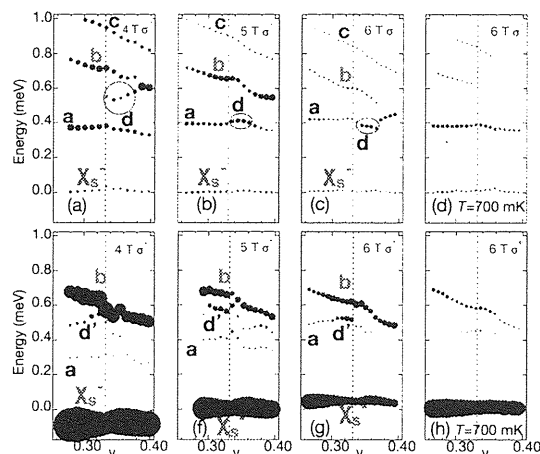


図 6: (a) 4 T, (b) 5 T, (c) 6 T, $T=25$ mK における σ^- 円偏光発光ピークエネルギーの電子占有数 ν 依存性。 (d) 6 T, $T=700$ mK における σ^- 円偏光発光ピークエネルギーの電子占有数 ν 依存性。 (e) 4 T, (f) 5 T, (g) 6 T, $T=25$ mK における σ^+ 円偏光発光ピークエネルギーの電子占有数 ν 依存性。 (h) 6 T, $T=700$ mK における σ^+ 円偏光発光ピークエネルギーの電子占有数 ν 依存性。円の面積は発光ピーク強度を表す。

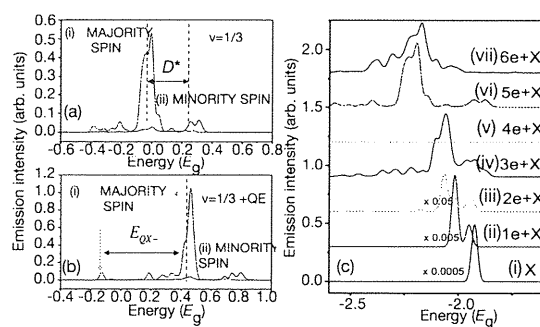


図 7: (a) 電子占有数 $\nu=1/3$ における (i) 多数スピン、(ii) 少数スピン電子の再結合発光スペクトルの計算結果。 (b) 電子占有数 $\nu=1/3$ に準電子 (QE) を一個加えた場合における (i) 多数スピン、(ii) 少数スピン電子の再結合発光スペクトルの計算結果。 (c) 磁場 B を磁束量子 $S^*=12$ に固定した場合の発光スペクトルの電子数依存性。 (i) 0 電子 (e) + 励起子 (X), (ii) $1e+X$, (iii) $2e+X$, (iv) $3e+X$, (v) $4e+X$, (vi) $5e+X$, (vii) $6e+X$. $4e+X$ の場合に発光が消失する。 $5e+X$ が $\nu=1/3$ に相当する。

(3) 半導体中スピン観測のためのナノ SQUID 走査型顕微鏡の開発 (柴田、野村)

少数電子スピンの直接的な観測のために、走査型 Nb 微小 SQUID 顕微鏡の開発を行った。微弱な磁束の局所的な検出を行うためには、SQUID のループサイズを微細化するとともにプローブ上に作成した SQUID と測定対象との間の距離の最小化が必要となる。そこで、シリコン基板の端に Nb 超伝導薄膜からなる 4 端子電極を作成したものを走査用のプローブとして用いた。SQUID プローブの先端には、収束イオンビームで作製した、弱結合マイクロブリッジ型 dc-SQUID を用いた。図に示すように、He 循環型無冷媒冷凍機中の 3 軸ステージ上に試料を設置し、水晶振動子を用いたシア

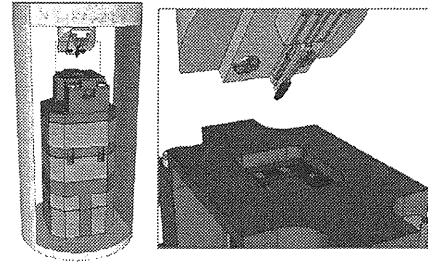


図 8 : (左) He 循環型無冷媒冷凍機中に設置した走査型 Nb 微小 SQUID 顕微鏡の概略図。(右) 微小 SQUID プローブとホールバー構造試料近傍の拡大図。

フォース制御により SQUID プローブと試料表面との間の距離の制御を行う実験系を構築した。この実験系を用いて、GaAs 単一ヘテロ接合ホールバー構造試料表面での局所磁気走査観察を行った。試料表面付近での磁束分布の実空間での可視化が可能であることが示され、磁氣的空間分解能と SQUID-試料間距離との対応関係が明らかにされた。

本研究は産業技術総合研究所柏谷聡氏のグループ、東京理科大学教授高柳英明氏のグループとの共同研究である。

(4) Si ナノレイヤー・ナノワイヤーの発光分光 (櫻井、野村) [論文 8, 11]

最近の Si ナノファブリケーションの著しい発展によって、良質の Si ナノレイヤーや Si ナノワイヤー試料が得られるようになった。これらの試料を用いて、低次元系における電子-正孔系の研究を行った。低温かつ強光励起密度下では、バルク半導体中において自由励起子ガス (FE) や電子正孔プラズマ (EHP) は電子正孔液相 (EHD) と呼ばれる液体相へ凝縮することが知られている。低次元系にキャリアを閉じ込めることで、相関エネルギーが増大し、EHD への転移を促す。一方、量子閉じ込めによって、バルク Si のバンドの縮退が解け、EHD への転移温度を抑制する可能性がある。このように、相反する二つの効果のため、閉じ込め効果が凝縮相への相転移を促進させるのか否かは明らかではなかった。そこで、本研究では Si ナノ構造、即ち Si ナノレイヤーと Si ナノワイヤーの発光分光により低次元系での電子正孔状態の研究を行った。発光スペクトルのフィットからキャリア密度、フェルミエネルギー、化学ポテンシャル、キャリア温度を得た。このキャリア密度とキャリア温度のプロットから、Si ナノレイヤーにおける EHD と EHP の相境界が初めて決定された。EHD と EHP の間の、観測された最大の転移温度は、膜厚が薄いほど高くなることが示され、膜厚 6.1 nm の試料では、バルクでの転移温度を越えることを初めて見いだした。以上の結果は、EHD 状態の安定性が閉じ込めにより増すことを分光学的に初めて示したものである。

Si ナノワイヤー試料からの発光スペクトルには、バルク励起子よりも長波長側にブロードなバンドが見られた。Si ナノワイヤー試料の顕微発光マッピングを行った結果、ナノワイヤーの軸方向に均一な発光スペクトルが得られ、ナノワイヤーが均一に作製されていることが示された。また、ワイヤー幅の減少とともに

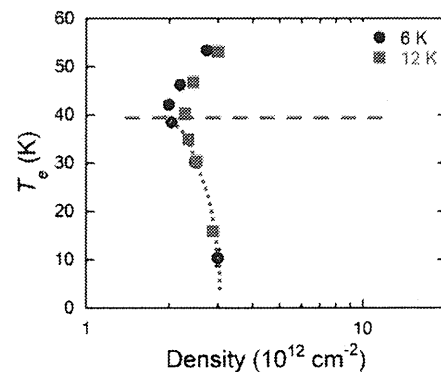


図 9 : 膜厚 6.1 nm の Si ナノレイヤー試料におけるキャリア温度-キャリア密度。点線が今回決定された EHD と EHP の相境界。破線は観測された最大の転移温度 T_c を表す。

ブロードなバンドのピークエネルギーが高エネルギー側へシフトすることが観測された。これらはナノ構造を反映した発光が観測されたことを示している。さらに水素アニール温度の異なる複数のSi ナノワイヤー試料からの発光強度を調べた結果、アニール温度が 400°Cの試料において発光強度が最も大きいことが見いだされた。発光強度はおよそ界面の欠陥密度の逆数に比例すると考えられ、400°Cにおいて水素処理された試料が最も界面準位が少ないことを示している。この結果は電気測定から得られる界面準位密度の結果と整合した。以上により、光学的手法による評価は、Si ナノワイヤーのみならず、他のSi デバイスに対しても広く有用であることが示された。

本研究は山田啓作教授、大毛利健治准教授、名古屋大学教授白石賢二氏、東京工業大学教授岩井洋氏、准教授角嶋邦之氏との共同研究である。

【3】 半導体量子構造のスピン光物性

(1) ZnO中のGaに束縛された電子のスピン緩和（富本慎一）

半導体中の中性ドナー原子 (D^0) に束縛された電子のスピンは、量子ドット中の電子と同程度の長いスピンコヒーレンス時間 (T_2^*) を持つ。また、ドナー束縛励起子 (D^0X) 状態と D^0 との間の遷移 ($D^0X \rightarrow D^0$ 間遷移) は均一な周波数を持つため、空間的に遠く離れた場所にある別個の電子のスピン状態間の量子もつれ (エンタングルメント) を、光子を介して生成出来ると期待されている。ウルツ鉱型結晶構造をもつZnOでは、結晶場とスピン軌道相互作用の影響で価電子帯が Γ 点においても3つに分裂しており、 D^0X の内部状態が比較的単純であるという特長がある。本研究では、ドナー原子としてGaを含むZnOで時間分解カー回転 (TRKR) 測定を行い、 D^0 の T_2^* を調べた。

図10に、温度 $T=1.8$ K、磁場 $B=0.5$ T (フォークト配置) で測定したTRKRの時間変化を示す。試料は、サファイアのa面基板上にMBE法で成長したZnOの薄膜 (厚さ $1.4 \mu\text{m}$) であり、 $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の濃度でGaを含んでいる。ポンプ・プローブ光の波長 (370 nm) は $D^0X \rightarrow D^0$ 間遷移に共鳴している。負の遅延時間においても振動が観測されており、レーザーパルスの繰り返し間隔 (12.2 ns) と同じ程度の長いコヒーレンス時間を持つことが分かる。 T_2^* を正確に求めるために、共鳴スピン増幅 (RSA) 測定を行った (図11)。これは、遅延時間を -250 psに固定して、TRKRを磁場の関数として測定する実験である。実験結果 (点) の $B=0$ T近傍に現れているピークに理論式をフィッティング (実線) することで、 T_2^* は12 nsと求められた。ドナー原子に束縛されている電子のスピンは、その付近の結晶格子中のイオンがもつ核スピンと相互作用しており、それがスピン緩和の原因である。核スピンが電子に及ぼす影響を、有効磁場の大きさとして定量的に評価するために、TRKRの磁場依存性の測定をファラデー配置でも行った (図12)。実験結果は $B=0$ T付近にディップを示す。この幅から有効磁場の大きさは1.3 mTと求まった。

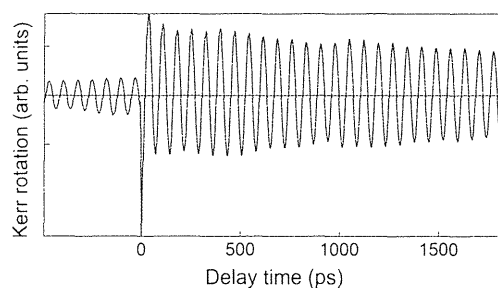


図 10 : Ga をドーピングした ZnO 薄膜における TRKR の測定結果

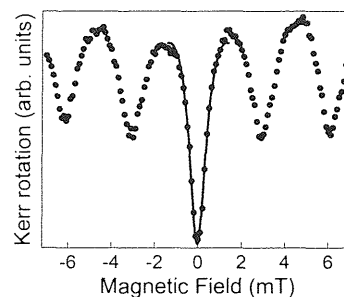


図 11 : RSA の測定結果

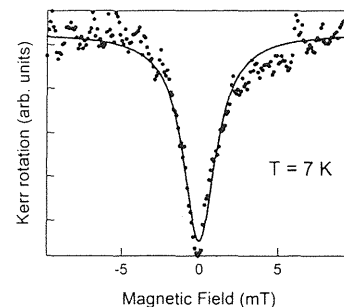


図 12 : ファラデー配置での測定結果

<論文>

1. L. Zhang, M. Ikezawa, T. Mori, S. Umehara, Y. Sakuma, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Single photon generation from an impurity center with well-defined emission energy in GaAs", Jpn. J. Appl. Phys. 52, 04CG11 (2013).
2. P. Jing, W. Ji, X. Yuan, M. Ikezawa, L. Zhang, H. Li, J. Zhao, Y. Masumoto: "Photoinduced Charge Separation and Recombination Processes in CdSe Quantum Dot and Graphene Oxide Composites with Methylene Blue as Linker", J. Phys. Chem. Lett. 4, 2919 (2013).
3. 舛本泰章: "量子ドットのスピン緩和" 固体物理, Vol.48, No.10, 485 (2013).
4. J. Sun, D. Zhu, J. Zhao, M. Ikezawa, X. Wang, Y. Masumoto: "Ultrafast carrier dynamics in CuInS₂ quantum dots", Appl. Phys. Lett. 104, 023118 (2014).
5. Y. Masumoto, H. Takagi, H. Umino, E. Suzumura: "Fast Electron Transfer from PbSe Quantum Dots to TiO₂", AIP Conf. Proc. 1566, 520 (2013); 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) (Zurich, 2012).
6. M. Ikezawa, L. Zhang, Y. Sakuma, T. Mori, K. Sakoda, Y. Masumoto: "Fourier Spectroscopy of Individual Nitrogen Impurity Centers in GaAs", AIP Conf. Proc. 1566, 544 (2013); 31th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2012) (Zurich, 2012).
7. S. Nomura, M. Yamaguchi, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, M. Korkusinski, and P. Hawrylak: "Photoluminescence fine structures in the fractional quantum Hall effect regime", Phys. Rev. B **89** (11), 115317 (2014).
8. Yoko Sakurai, Kuniyuki Kakushima, Kenji Ohmori, Keisaku Yamada, Hiroshi Iwai, Kenji Shiraishi, and Shintaro Nomura: "Photoluminescence Characterization in Silicon Nanowire Fabricated by Thermal Oxidation of Nano-scale Si Fin Structure", Optics Express **22** (2) 1997-2006 (2014).
9. K. Ohtaki, K. Ohmori, and S. Nomura: "Time resolved measurements of ultrafast transport pulses using photoconductive switches", AIP Conf. Proc. **1566**, 403 (2013).
10. H. Ito, Y. Shibata, S. Mamyoda, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka, and S. Nomura: "Imaging of quantum Hall edge states under quasiresonant excitation by a near-field scanning optical microscope", AIP Conf. Proc. **1566**, 271 (2013).
11. Y. Sakurai, T. Tayagaki, K. Ohmori, K. Yamada, Y. Kanemitsu, K. Shiraishi, S. Nomura, "Fast luminescence decay of electron-hole quasi-two dimensional systems in Si nanolayer": AIP Conf. Proc. **1566**, 445 (2013).

<学位論文>

数理工学物質科学研究科物質創成先端科学専攻博士論文 (2014年3月)

1. 櫻井 蓉子: "Spectroscopic Study of Correlated Electron-Hole Systems in Silicon Nanostructures"
2. 孫 建輝: "Charge transfer from CuInS₂ quantum dots for solar cells"

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文 (2014 年 3 月)

1. 海野 晃: "Charge transfer and spin dephasing in colloidal quantum dots"
2. 薫田 康弘: 「光スイッチを用いた超高速輸送現象測定」
3. 間明田 周平: 「走査型近接場光学顕微鏡を用いたスピンした分裂量子ホール端状態の観測」

<国際会議>

1. Y. Masumoto, H. Takagi, H. Umino, E. Suzumura: "Fast electron transfer from PbSe quantum dots to TiO₂", 18th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (Fuzhou, China, 2013.8).
2. Y. Masumoto: "Fast charge transfer from quantum dots for solar cells", 1st International Conference on Nano-Bio-Medicine Convergence (NBMC-2014) (PNU, Korea, 2014.2) 招待講演
3. H. Ito, S. Mamyouda, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Imaging of spin-resolved quantum Hall edge states by near-field scanning optical microscopy", The 20th international conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (Wroclaw, 2013.7).
4. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Mapping of spin-resolved quantum Hall chiral edge channels", International Symposium on Nanoscale Transport and Technology, (Atsugi, 2013.11).
5. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Near-field scanning optical microscope imaging of spin-resolved quantum Hall chiral edge states", International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology, (Kauai, 2013.12).
6. S. Mamyouda, T. Ohira, L. Yoshikawa, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Nomura, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura and T. Akazaki: "Near-field scanning optical microscopy for investigation of quantum Hall chiral edge state", 2nd DYCE-ASIA Workshop, (Kashiwa, 2013.12).
7. Y. Sakurai, C. Tsukamoto, K. Kakushima, K. Ohmori, K. Yamada, H. Iwai, T. Tayagaki, Y. Kanemitsu, K. Shiraishi, and S. Nomura: "Optical properties of silicon nanostructures at high optical excitations", 2nd DYCE-ASIA Workshop, (Kashiwa, 2013.12).

<講演>

1. 野村晋太郎, 「量子ホール系カイラルエッジ状態の空間分解分光研究」新学術領域研究「トポロジカル量子現象」第11回 集中連携研究会「時間反転対称性を破る超伝導体の新奇界面現象」(2013年6月)
2. 佐久間大輔, 田野佑典, 石黒亮輔, 柏谷聡, 野村晋太郎, 高柳英明, 「アルミニウムトンネル型単一微小ジョセフソン接合の特異な輸送特性研究」、日本物理学会秋季大会 (2013年9月)
3. 櫻井蓉子, 大毛利健治, 山田啓作, 野村晋太郎, 「Siナノレイヤー中電子正孔凝縮状態の膜厚依存性」、日本物理学会秋季大会 (2013年9月)
4. 間明田周平, 柴田祐輔, 伊藤宙陸, 柏谷聡, 山口真澄, 田村浩之, 赤崎達志, 大塚洋一, 野村晋太郎, 「近接場光学顕微鏡を用いたスピン分裂量子ホール端状態の観測」、日本物理学会秋季大会 (2013年9月)
5. 野村晋太郎, 「間接型励起子とdarkな励起子」平成25年度東北大プロジェクト研究会2013年11月)
6. 野村晋太郎, 「スピン分裂した量子ホール系カイラルエッジ状態の光学的検出」、新学術領域研究「トポロジカル量子現象」第4回 領域研究会 (2013年12月)

7. 永合祐輔、土屋翔吾、篠崎智也、石黒亮輔、柏谷裕美、柏谷聡、野村晋太郎、高柳英明、前野悦輝、「 Sr_2RuO_4 中の半整数量子渦検出に向けたマイクロ SQUIDの開発」、新学術領域研究「トポロジカル量子現象」第4回 領域研究会 (2013年12月)
8. 海野晃、舛本泰章：「CdS 量子ドットの電荷移動とスピンドィフェージング」 日本物理学会第69回年次大会 (2014年3月)
9. J. Sun (孫建輝)、J. Zhao、舛本泰章：「Ultrafast carrier dynamics in CuInS_2 quantum dots」 日本物理学会第69回年次大会 (2014年3月)
10. 池沢道男、張遼、佐久間芳樹、迫田和彰、舛本泰章：「単一発光中心の共鳴励起による単一光子発生」 第61回応用物理学会春季学術講演会 (2014年3月)
11. 塚本知九馬、野村晋太郎、「 MoS_2 薄膜における第二次高調波発生強度の層数依存性」第61回応用物理学会春季学術講演会 (2014年3月)
12. 柴田祐輔、柏谷裕美、石黒亮輔、柏谷聡、高柳英明、野村晋太郎、「局所磁気観察のための走査型Nb微小SQUID顕微鏡の開発」第61回応用物理学会春季学術講演会 (2014年3月)
13. 土屋翔吾、篠崎智也、永合祐輔、石黒亮輔、柏谷聡、柏谷裕美、野村晋太郎、前野悦輝、高柳英明「 Sr_2RuO_4 に流れるカイラルエッジ電流検出に向けたMicro-SQUIDの開発」第61回応用物理学会春季学術講演会 (2014年3月)
14. 塚本知九馬、櫻井蓉子、大毛利健治、山田啓作、角嶋邦之、岩井洋、白石賢二、野村晋太郎、「リソグラフィーで作製したシリコンナノワイヤーアレーの光学特性」日本物理学会第69回年次大会 (2014年3月)
15. 間明田周平、柴田祐輔、伊藤宙陸、大平智也、吉川ルノ、柏谷聡、山口真澄、田村浩之、赤崎達志、大塚洋一、野村晋太郎、「近接場光学顕微鏡を用いたスピン分裂量子ホール端状態の観測 II」 日本物理学会第69回年次大会 (2014年3月)